

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ
О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ
ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 536.21

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$.
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР
ОТ 80 К ДО 400 К

ССД СНГ 321–2019 (ГСССД 321–2017)

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, ШИФР ТЕМЫ

АИС МГС: [RU.3.011-2019](#))

РАЗРАБОТАНЫ	Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК-180 «Межгосударственная служба стандартных справочных данных»
ВНЕСЕНЫ	Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии
Авторы:	С.М. Лугуев, Н.В Лугуева.
СОГЛАСОВАНЫ	с национальными органами по стандартизации стран СНГ:
РЕКОМЕНДОВАНЫ	Научно-технической комиссией по метрологии Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации
ПРИНЯТЫ	Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протоколом от XX 2019 г. № XX-2019)

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ
О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ
ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

Таблицы стандартных справочных данных

Оптически прозрачные материалы $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$.	ССД СНГ
Теплопроводность в диапазоне температур от 80 К до 400 К	321–2019
	ГСССД
	321–2017

Tables of Standard Reference Data

Optically transparent materials materials based on $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$.	SSD CNG
Thermal conductivity in the temperature range from 80 to 400 K	321–2019
	GSSSD
	321–2017

АННОТАЦИЯ

Приведены таблицы стандартных справочных данных о величине и температурной зависимости коэффициента теплопроводности оптически прозрачных материалов на основе твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$ в диапазоне температур от 80 до 400 К. Измерения коэффициента теплопроводности материалов выполнены абсолютным стационарным методом, основанном на создании линейного теплового потока через исследуемый образец. Суммарная средняя квадратическая погрешность измерений составляет от 2 до 4 % в зависимости от области температуры.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	6
2. Основные области для применения оптически прозрачных материалов на основе твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$	7
3. Общие сведения о материалах.....	9
4. Условные обозначения, термины и их пояснения..	10
5. Методика определения теплопроводности	11
6. Таблицы стандартных справочных данных	13
7. Приложение. Таблицы отклонений первичных экспериментальных данных о коэффициенте теплопроводности от расчетных.....	20
8. Список литературы.....	30

1. ВВЕДЕНИЕ

Соединение CaLa_2S_4 и твердые растворы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ обладают рядом уникальных физико-химических свойств, которые определяют их привлекательность для технических применений. Эти материалы имеют широкую полосу оптической прозрачности (0.4-18 мкм) [1-8]. Они обладают кубической структурой типа фосфида тория [2, 6, 9] и ввиду этого оптически и механически изотропны. Высокие температуры плавления (вблизи 2100 K) [9, 10] позволяют использовать их при более высоких температурах, чем оптические материалы из группы A^2B^6 .

Наиболее используемые в настоящее время для ИК-аппаратуры материалы – это галогениды щелочных металлов, сульфид цинка и селенид цинка. Эти материалы не обладают достаточной твердостью и износостойкостью, необходимой для большинства их применений. Кроме того, оптическое пропускание материалов из группы A^2B^6 снижается в длинноволновой части инфракрасного спектра [2, 5].

Поиск материалов с лучшими для практического применения, чем у ZnS , физико-химическими качествами привел к пониманию, что материалы с общей формулой AB_2S_4 (А – щелочноземельный двухвалентный металл; В – редкоземельный металл) являются идеальными материалами для применения в далекой ИК области, поскольку имеют кубическую структуру (Th_3P_4), широкую полосу пропускания в ИК области спектра, высокую твердость, высокую точку плавления [5]. Среди них CaLa_2S_4 является наиболее дешевым с точки зрения исходных материалов и имеет хорошее пропускание в области длин волн 0.4-14 мкм [1-8] и твердость 5-6 GPa [1-14]. Высокие значения твердости и модуля Юнга способствуют лучшему сопротивлению дождевой эрозии и более высокой износостойкости [4, 11, 13], что делает CaLa_2S_4 более привлекательным для применения по сравнению с ZnS , ZnSe . Соединение CaLa_2S_4 стабильно в окружающей атмосфере и может быть нагрето на воздухе до ста градусов Цельсия без заметных изменений, окисление начинается при температурах выше 800 K [11, 15].

Существует область твердых растворов с кубической структурой между стехиометрическими соединениями CaLa_2S_4 и La_2S_3 . Среди твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ имеются составы, у которых область пропускания шире (0.4-18 мкм), а коэффициент пропускания и значения твердости выше, чем у CaLa_2S_4 или La_2S_3 [1, 3, 5, 10, 12]. С уменьшением содержания Ca в составе твердого раствора температура начала окисления на воздухе повышается до 900 К в La_2S_3 [15]. В соответствии с этим в области твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ существуют составы с лучшим для технического применения сочетанием физико-химических свойств, что стимулирует их исследование и применение.

Коэффициент теплопроводности является одним из важных физических параметров, определяющих функциональные возможности использования материала. Данные о коэффициенте теплопроводности необходимы как при выборе материала с оптимальными свойствами для применения в тех или иных областях техники, так и при проведении расчетов в процессе технологических и конструкторских работ. Это обуславливает необходимость получения и аттестации данных о коэффициенте теплопроводности твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$, представляющих существенный интерес для различных технических применений.

2. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$

Материалы, прозрачные в ИК-области спектра, особенно в области 8-14 мкм, необходимы для окон датчиков, работающих в инфракрасной области спектра и служащих для определения инфракрасного излучения с целью обнаружения объектов при комнатной температуре [5]. Эти датчики используются в оборудовании для наблюдения, устройствах оповещения, в системах искателей и нацеливания в высокоточном вооружении. Датчики,

работающие в интервале длин волн 8-12 мкм, находят применение в воздушных, морских транспортных средствах, в промышленной автоматике. Эти датчики защищаются от окружающей среды окнами и куполами, прозрачными для инфракрасного излучения. Главным условием для применения материалов для этих целей является их прозрачность в необходимом диапазоне инфракрасного спектра. Наряду с этим, такие материалы должны обладать механической и термической прочностью, высоким сопротивлением дождевой эрозии, износостойкостью, чтобы выдерживать сложные условия окружающей среды. Оптическая прозрачность в длинноволновой области инфракрасного спектра CaLa_2S_4 и твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$, а также их высокая термическая, механическая и эрозийная стойкость, позволяют использовать их в качестве окон в промышленной автоматике, астрономических исследованиях, на метеоспутниках, в морских, воздушных транспортных средствах [2-5, 10, 12, 16, 17].

Особенности кристаллической структуры тройных соединений MLa_2S_4 (М – щелочноземельный металл) создают возможность сульфидионного переноса в твердых растворах на основе этих соединений. При определенных условиях эти материалы характеризуются ионной проводимостью, сравнимой с проводимостью водных растворов электролитов и расплавов солей. Наличие практически униполярной сульфидионной проводимости в соединениях MLa_2S_4 (CaLa_2S_4 в их числе) обеспечивает высокий потенциал возможностей применения этих твердотельных электролитов [18-21].

Твердые электролиты с проводимостью по ионам серы находят применение в качестве сенсоров для анализа серосодержащих газовых сред, ионоселективных мембран для получения полупроводниковых сульфидов контролируемого состава, а также в электрохимических устройствах для исследования термодинамики и кинетики различных процессов. Они перспективны как электролиты литий-серных источников тока,

превосходящих в несколько раз традиционные литий-ионные аккумуляторы по удельной плотности энергии [21].

3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

Соединения CaLa_2S_4 и твердые растворы системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ получены методом вакуумного рекристаллизационного прессования порошков исходного материала. Порошки соединений получают действием H_2 , H_2S и CS_2 на кислородосодержащие соединения лантана и кальция [22]. Необходимое соотношение H_2S и CS_2 и сульфидирующей смеси устанавливается изменением температуры в печи. При сульфидировании совместным действием H_2S и CS_2 при 1280 К получают фазы CaS и $\beta\text{-La}_2\text{S}_3$, а затем происходит реакция $\text{CaS} + \text{La}_2\text{S}_3 = \text{CaLa}_2\text{S}_4$. Порошки отжигаются в ампуле в парах серы в течение 300 часов с последующей отгонкой серы, для получения соединения необходимого состава. Конечный продукт представляет собой однофазный кристаллический порошок соответствующих составов твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ со средним размером частиц 5-8 мкм.

Для получения поликристаллов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ из порошков используют метод горячего рекристаллизационного прессования [23]. Прессование проводится в вакуумной пресс-печи при температуре ~ 1600 К, удельном давлении 200 МПа, время выдержки под давлением – 40 минут. Затем образцы отжигаются в потоке сульфидирующих газов (H_2S и CS_2) при температуре 1270 К в течение 2 часов. В результате получают плотные и прозрачные поликристаллические образцы со средним размером зерен 4-6 мкм. Уменьшение среднего размера зерна по сравнению с исходным порошком объясняется протеканием процессов первичной рекристаллизации в порошках, подвергнутых пластической деформации во время прессования. Состав соединений контролируется по данным газохроматографического [24] и химического анализов. По результатам рентгенофазового анализа все полученные таким методом соединения системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ однофазны и имеют структуру Th_3P_4 . О чистоте образцов свидетельствует и высокая

прозрачность этих соединений $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$, которые имеют почти ту же прозрачность, что и монокристаллические образцы соответствующего состава.

Имеющиеся в литературе данные о теплопроводности CaLa_2S_4 и соединений твердых растворов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ при 300 К представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные о коэффициенте теплопроводности CaLa_2S_4 и соединений твердых растворов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ при 300 К

Состав	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	Литературный источник
CaLa_2S_4	2,51	[1]
	1,67	[2]
	1,7	[4]
	1,68	[6]
	1,6	[8]
	1,51	[25]
	1,72	[14, 26, 27]
$0,6\text{La}_2\text{S}_3\text{-}0,4 \text{ CaS}$	1,66	[14, 26, 27]
$0,7\text{La}_2\text{S}_3\text{-}0,3 \text{ CaS}$	1,7	[1]
	1,57	[14, 26, 27]
$0,8\text{La}_2\text{S}_3\text{-}0,2 \text{ CaS}$	1,36	[14, 26, 27]
$0,9\text{La}_2\text{S}_3\text{-}0,1 \text{ CaS}$	1,38	[14, 26, 27]

Некоторые сведения о теплофизических свойствах кристаллов твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ содержатся и в работах [28-30]. В работе [28] исследованы монокристаллические образцы.

4. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ТЕРМИНЫ И ИХ ПОЯСНЕНИЯ

κ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

$\Delta\kappa$ – суммарная погрешность измерения коэффициента теплопроводности, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

$\kappa_{\text{эксп}}$ – значения коэффициента теплопроводности, полученные в эксперименте, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

$\kappa_{\text{расч}}$ – значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные по аппроксимационным уравнениям, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

$\delta\kappa, \%$ - относительное отклонение значений коэффициента теплопроводности, рассчитанных по аппроксимационным уравнениям, от экспериментальных данных.

5. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Измерения коэффициента теплопроводности образцов выполнялись абсолютным стационарным методом, основанном на создании линейного теплового потока через исследуемый образец. Используемая авторами экспериментальная установка представляет собой модифицированный вариант низкотемпературной экспериментальной установки, описание которой приведено в статье [31], монографии [32] и справочнике [33] как установки, позволяющей получать надежные экспериментальные данные о коэффициенте теплопроводности. Методика экспериментального определения теплопроводности аттестована ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» в качестве методики ГСССД МЭ 218-2014 [34], где приведены принципиальная схема прибора, методика проведения измерений и расчетные формулы. В этой установке измерения теплопроводности проводятся по аналогии с измерениями электрического сопротивления потенциометрическим методом, что исключает необходимость учета контактных тепловых сопротивлений между образцами, нагревателем и холодильниками. Суммарная погрешность результатов измерений на экспериментальной установке в диапазоне температур 80-400 К с учетом погрешностей измерения мощности нагревателя, излучения с боковых

поверхностей образцов и нагревателя, оттока или подвода тепла по проводам, погрешностей измерения геометрических размеров образцов, температуры термодатчиками составляет $2 \div 4$ % в зависимости области температур, геометрических размеров исследуемых образцов и их теплопроводности.

Поскольку соединения $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ являются полупрозрачными, необходим учет влияния на полученные экспериментальные результаты радиационного теплопереноса (вклада фотонной компоненты). Для случая, когда длина свободного пробега фотонов, определяемая внутренним поглощением $l_{\text{погл}} = 1/\alpha$, где α – коэффициент поглощения данного вещества для длин волн, соответствующих максимуму излучения при температуре T , мала по сравнению с размерами образца, фотонная теплопроводность определяется выражением $\kappa_{\text{фот}} = (16n^2\sigma T^3)/3\alpha$, где n – показатель преломления, σ – постоянная Стефана-Больцмана [35]. Если $1/\alpha$ значительно больше размера зерен в кристалле или диаметра образца, то $\kappa_{\text{фот}} = (16n^2\sigma T^3 d)/3$.

В соединении CaLa_2S_4 коэффициент поглощения равен 0.12 см^{-1} [3, 5], а размер зерен 4-6 мкм, и $l_{\text{погл}}$ значительно больше размера зерен. Ввиду этого длина свободного пробега в CaLa_2S_4 определяется размером зерен, и расчеты показали, что при 400 К величина $\kappa_{\text{фот}} = 0.0039 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$. Это составляет 0.3% от измеренной величины коэффициента теплопроводности CaLa_2S_4 , что заметно ниже погрешности измерения коэффициента теплопроводности экспериментальной установки. Поскольку значения коэффициентов поглощения, преломления и размеры зерен для других составов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ незначительно отличаются от CaLa_2S_4 , то вклад $\kappa_{\text{фот}}$ в теплоперенос и в других составах $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ имеет такой же порядок. Таким образом в поликристаллических образцах твердых растворов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$ влияние радиационного теплопереноса на экспериментальные результаты коэффициента теплопроводности в области температур ниже 400 К незначительно.

6. ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

Основой для разработки таблиц стандартных справочных данных явились результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности твердых растворов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4 - \text{La}_2\text{S}_3$, проведенные авторами в Институте физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН.

Измерения проводились по методике “Методика экспериментального определения теплопроводности твердых тел в диапазоне температур 80...450 К”, зарегистрированной в Российском научно-техническом центре информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ») под № ГСССД МЭ 218-2014.

Полученные результаты аппроксимированы полиномами третьей степени по методу наименьших квадратов. Ниже представлены аналитические зависимости, аппроксимирующие данные о коэффициенте теплопроводности каждого материала:

CaLa_2S_4 :

$$\kappa = 7,379127 - 0,04787T + 0,0001139T^2 - 1,4 \cdot 10^{-7}T^3 \quad (1)$$

0.6 La_2S_3 -0.4 CaS :

$$\kappa = 6,224417 - 0,0375064T + 0,000105379T^2 - 1,03971 \cdot 10^{-7}T^3 \quad (2)$$

0.7 La_2S_3 -0.3 CaS :

$$\kappa = 5,488967 - 0,03333 T + 9,71 \cdot 10^{-5}T^2 - 9,9 \cdot 10^{-8}T^3 \quad (3)$$

0.8 La_2S_3 -0.2 CaS :

$$\kappa = 4,837469 - 0,02894T + 8,6 \cdot 10^{-5}T^2 - 9,3 \cdot 10^{-8}T^3 \quad (4)$$

0.9 La_2S_3 -0.1 CaS :

$$\kappa = 4,857008 - 0,02792T + 7,73 \cdot 10^{-5}T^2 - 7,6 \cdot 10^{-8}T^3 \quad (5)$$

Стандартные справочные данные о коэффициенте теплопроводности соединений CaLa_2S_4 ; $0.6 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0.4 \text{ CaS}$; $0.7 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0.3 \text{ CaS}$; $0.8 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0.2 \text{ CaS}$; $0.9 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0.1 \text{ CaS}$ в диапазоне температур от 80 до 400 К, рассчитанные по уравнениям (1) – (5) при равных значениях температуры, представлены в таблицах 2–6. Там же указаны абсолютные значения суммарной погрешности их определения ($\Delta\kappa$).

В таблицах П.1–П.5 приложения содержатся отклонения исходных экспериментальных данных ($\kappa_{\text{эксп}}$) о коэффициенте теплопроводности от значений ($\kappa_{\text{расч}}$), рассчитанных по (1)–(5), %

$$\delta\kappa = \frac{\kappa_{\text{эксп}} - \kappa_{\text{расч}}}{\kappa_{\text{эксп}}} \cdot 100. \quad (6)$$

Из таблиц П.1–П.5 следует, что эти отклонения не превышают 2%, что составляет величину меньшую суммарной погрешности эксперимента.

Таблица 2 – Стандартные справочные данные о теплопроводности CaLa_2S_4

T, K	κ , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$\Delta\kappa$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
80	4,36	0,087
85	4,22	0,084
90	4,09	0,082
95	3,96	0,079
100	3,84	0,077
105	3,72	0,074
110	3,60	0,072
115	3,49	0,070
120	3,39	0,068
125	3,29	0,066
130	3,19	0,064
135	3,10	0,062
140	3,01	0,060
145	2,92	0,058
150	2,84	0,057
155	2,77	0,055
160	2,70	0,054
165	2,63	0,053
170	2,56	0,051
175	2,50	0,050
180	2,44	0,049
185	2,38	0,048
190	2,33	0,047
195	2,28	0,046
200	2,23	0,045
205	2,19	0,045
210	2,14	0,045
215	2,11	0,045
220	2,07	0,046
225	2,03	0,046
230	2,00	0,046
235	1,97	0,046
240	1,94	0,047

T, K	κ , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$\Delta\kappa$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
245	1,92	0,047
250	1,89	0,047
255	1,87	0,048
260	1,85	0,048
265	1,83	0,048
270	1,81	0,049
275	1,79	0,049
280	1,78	0,050
285	1,76	0,050
290	1,75	0,051
295	1,74	0,051
300	1,72	0,052
305	1,71	0,052
310	1,70	0,053
315	1,69	0,053
320	1,68	0,054
325	1,67	0,054
330	1,66	0,055
335	1,65	0,055
340	1,64	0,056
345	1,63	0,056
350	1,62	0,057
355	1,61	0,057
360	1,60	0,058
365	1,59	0,058
370	1,57	0,058
375	1,56	0,058
380	1,55	0,059
385	1,53	0,059
390	1,51	0,059
395	1,50	0,059
400	1,48	0,059
405	1,46	0,059

Таблица 3 – Стандартные справочные данные о теплопроводности твердого раствора $0.6 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0.4 \text{ CaS}$.

T, K	κ , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$\Delta\kappa$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
80	3,84	0,077
85	3,73	0,075
90	3,63	0,073
95	3,52	0,070
100	3,42	0,068
105	3,33	0,067
110	3,24	0,065
115	3,15	0,063
120	3,06	0,061
125	2,98	0,060
130	2,90	0,058
135	2,83	0,057
140	2,75	0,055
145	2,68	0,054
150	2,62	0,052
155	2,56	0,051
160	2,50	0,050
165	2,44	0,049
170	2,38	0,048
175	2,33	0,047
180	2,28	0,046
185	2,23	0,045
190	2,19	0,044
195	2,15	0,043
200	2,11	0,042
205	2,07	0,042
210	2,03	0,043
215	2,00	0,043
220	1,97	0,043
225	1,94	0,044
230	1,91	0,044
235	1,88	0,044
240	1,86	0,045

T, K	κ , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$\Delta\kappa$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
245	1,83	0,045
250	1,81	0,045
255	1,79	0,046
260	1,77	0,046
265	1,75	0,046
270	1,73	0,047
275	1,72	0,047
280	1,70	0,048
285	1,69	0,048
290	1,67	0,048
295	1,66	0,049
300	1,65	0,050
305	1,64	0,050
310	1,63	0,050
315	1,62	0,051
320	1,61	0,052
325	1,60	0,052
330	1,59	0,052
335	1,58	0,053
340	1,57	0,053
345	1,56	0,054
350	1,55	0,054
355	1,54	0,055
360	1,53	0,055
365	1,52	0,056
370	1,51	0,056
375	1,50	0,056
380	1,48	0,056
385	1,47	0,057
390	1,46	0,057
395	1,44	0,057
400	1,43	0,057
405	1,41	0,057

Таблица 4 – Стандартные справочные данные о теплопроводности твердого раствора 0.7 La₂S₃ – 0.3 CaS.

T, K	κ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	$\Delta\kappa$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
80	3,39	0,068
85	3,30	0,066
90	3,20	0,064
95	3,11	0,062
100	3,03	0,061
105	2,94	0,059
110	2,87	0,057
115	2,79	0,056
120	2,72	0,054
125	2,65	0,053
130	2,58	0,052
135	2,52	0,050
140	2,45	0,049
145	2,40	0,048
150	2,34	0,047
155	2,29	0,046
160	2,24	0,045
165	2,19	0,044
170	2,14	0,043
175	2,10	0,042
180	2,06	0,041
185	2,02	0,040
190	1,98	0,040
195	1,95	0,039
200	1,92	0,038
205	1,89	0,039
210	1,86	0,039
215	1,83	0,039
220	1,80	0,040
225	1,78	0,040
230	1,76	0,040
235	1,74	0,041
240	1,72	0,041

T, K	κ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	$\Delta\kappa$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
245	1,70	0,042
250	1,68	0,042
255	1,67	0,043
260	1,65	0,043
265	1,64	0,044
270	1,62	0,044
275	1,61	0,044
280	1,60	0,045
285	1,59	0,045
290	1,58	0,046
295	1,57	0,046
300	1,56	0,047
305	1,56	0,048
310	1,55	0,048
315	1,54	0,048
320	1,53	0,049
325	1,52	0,049
330	1,52	0,050
335	1,51	0,051
340	1,50	0,051
345	1,49	0,051
350	1,49	0,052
355	1,48	0,052
360	1,47	0,053
365	1,46	0,053
370	1,45	0,054
375	1,44	0,054
380	1,43	0,054
385	1,42	0,055
390	1,40	0,055
395	1,39	0,055
400	1,38	0,055
405	1,36	0,055

Таблица 5 – Стандартные справочные данные о теплопроводности твердого раствора 0,8 La₂S₃ – 0,2 CaS.

T, K	κ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	$\Delta\kappa$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
80	3,02	0,060
85	2,94	0,059
90	2,86	0,057
95	2,78	0,056
100	2,71	0,054
105	2,64	0,053
110	2,57	0,052
115	2,50	0,050
120	2,44	0,049
125	2,38	0,048
130	2,32	0,046
135	2,27	0,045
140	2,21	0,044
145	2,16	0,043
150	2,12	0,042
155	2,07	0,041
160	2,03	0,041
165	1,98	0,040
170	1,94	0,039
175	1,91	0,038
180	1,87	0,037
185	1,84	0,037
190	1,80	0,036
195	1,77	0,035
200	1,74	0,035
205	1,71	0,035
210	1,69	0,035
215	1,66	0,036
220	1,64	0,036
225	1,62	0,036
230	1,59	0,037
235	1,57	0,037
240	1,55	0,037

T, K	κ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	$\Delta\kappa$, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
245	1,54	0,038
250	1,52	0,038
255	1,50	0,038
260	1,48	0,038
265	1,47	0,039
270	1,46	0,039
275	1,44	0,040
280	1,43	0,040
285	1,41	0,040
290	1,40	0,041
295	1,39	0,041
300	1,37	0,041
305	1,36	0,042
310	1,35	0,042
315	1,34	0,042
320	1,32	0,042
325	1,31	0,043
330	1,30	0,043
335	1,28	0,043
340	1,27	0,043
345	1,26	0,043
350	1,24	0,043
355	1,22	0,043
360	1,21	0,043
365	1,19	0,043
370	1,17	0,043
375	1,16	0,043
380	1,14	0,043
385	1,12	0,043
390	1,09	0,042
395	1,07	0,042
400	1,05	0,042
405	1,02	0,041

Таблица 6 – Стандартные справочные данные о теплопроводности твердого раствора $0,9 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0,1 \text{ CaS}$.

T, K	κ , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$\Delta\kappa$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
80	3,08	0,062
85	3,00	0,060
90	2,91	0,058
95	2,84	0,057
100	2,76	0,055
105	2,69	0,054
110	2,62	0,053
115	2,55	0,051
120	2,49	0,050
125	2,43	0,048
130	2,37	0,047
135	2,31	0,046
140	2,25	0,045
145	2,20	0,044
150	2,15	0,043
155	2,10	0,042
160	2,06	0,041
165	2,01	0,040
170	1,97	0,039
175	1,93	0,039
180	1,89	0,038
185	1,85	0,037
190	1,82	0,036
195	1,79	0,036
200	1,75	0,035
205	1,72	0,035
210	1,70	0,036
215	1,67	0,036
220	1,64	0,036
225	1,62	0,036
230	1,60	0,037
235	1,57	0,037
240	1,55	0,037

T, K	κ , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$\Delta\kappa$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
245	1,53	0,037
250	1,52	0,038
255	1,50	0,038
260	1,48	0,038
265	1,47	0,039
270	1,45	0,039
275	1,44	0,040
280	1,42	0,040
285	1,41	0,040
290	1,40	0,041
295	1,39	0,041
300	1,38	0,041
305	1,36	0,041
310	1,35	0,042
315	1,34	0,042
320	1,34	0,043
325	1,33	0,043
330	1,32	0,044
335	1,31	0,044
340	1,30	0,044
345	1,29	0,044
350	1,28	0,045
355	1,27	0,045
360	1,26	0,045
365	1,25	0,046
370	1,24	0,046
375	1,23	0,046
380	1,22	0,046
385	1,21	0,046
390	1,19	0,046
395	1,18	0,047
400	1,17	0,047
405	1,15	0,047

7. ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности кристалла CaLa_2S_4 от рассчитанных по (1).

T, K	$\kappa_{\text{эксп}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\kappa_{\text{расч}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta\kappa, \%$
81,04	4,39	4,335	1,25
82,32	4,34	4,300	0,92
85,84	4,25	4,203	1,10
86,77	4,20	4,177	0,55
90,24	4,03	4,085	-1,37
91,94	4,02	4,040	-0,50
95,94	3,98	3,939	1,03
97,42	3,85	3,902	-1,35
101,06	3,82	3,812	0,21
102,88	3,76	3,769	-0,24
108,63	3,58	3,635	-1,54
117,33	3,41	3,445	-1,03
123,27	3,31	3,322	-0,36
129,35	3,17	3,204	-1,07
141,57	2,95	2,983	-1,12
148,18	2,86	2,874	-0,49
153,73	2,78	2,788	-0,29
162,33	2,67	2,663	0,26
168,37	2,59	2,581	0,35
176,78	2,50	2,476	0,95
184,35	2,41	2,389	0,87
187,46	2,38	2,356	1,01
192,32	2,30	2,306	-0,26
197,57	2,24	2,254	-0,62
202,88	2,22	2,206	0,63
208,06	2,18	2,161	0,87
224,22	2,06	2,040	0,97
230,21	2,01	2,001	0,45
237,73	1,97	1,956	0,71
245,91	1,93	1,913	0,88
253,87	1,89	1,875	0,79
261,27	1,85	1,843	0,38
266,06	1,83	1,825	0,27
272,27	1,80	1,803	-0,17
281,22	1,80	1,774	1,44
290,36	1,77	1,748	1,24

Окончание таблицы П.1

Т, К	$\kappa_{\text{эксп}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\kappa_{\text{расч}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta\kappa, \%$
297,18	1,71	1,730	-1,17
298,74	1,72	1,727	-0,41
302,25	1,72	1,718	0,12
302,40	1,71	1,718	-0,47
306,76	1,69	1,708	-1,06
307,30	1,68	1,707	-1,61
312,22	1,68	1,696	-0,95
312,40	1,69	1,696	-0,35
316,59	1,69	1,687	0,18
317,58	1,68	1,685	-0,30
325,00	1,66	1,670	-0,60
337,23	1,63	1,646	-0,98
349,13	1,60	1,622	-1,38
358,20	1,59	1,602	-0,75
370,43	1,56	1,573	-0,83
377,24	1,55	1,554	-0,26
381,30	1,56	1,542	1,15
384,91	1,55	1,531	1,23
388,80	1,53	1,518	0,78
392,86	1,52	1,504	1,05

Таблица П.2 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности кристалла $0,6 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0,4 \text{ CaS}$ от рассчитанных по (2).

T, K	$\kappa_{\text{эксп}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\kappa_{\text{расч}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta\kappa, \%$
83,00	3,81	3,778	0,84
88,10	3,70	3,667	0,89
93,76	3,57	3,548	0,62
99,66	3,41	3,430	-0,59
105,29	3,29	3,322	-0,97
116,70	3,08	3,117	-1,12
120,94	3,03	3,046	-0,53
126,69	2,93	2,953	-0,78
128,25	2,92	2,928	-0,27
135,57	2,82	2,817	0,11
146,42	2,69	2,666	0,89
153,99	2,54	2,568	-1,10
165,83	2,45	2,428	0,90
177,25	2,33	2,308	0,94
180,44	2,26	2,277	-0,75
185,90	2,22	2,226	-0,27
191,78	2,16	2,174	-0,65
196,67	2,13	2,133	-0,14
204,60	2,07	2,071	-0,05
209,97	2,04	2,033	0,34
215,98	2,00	1,992	0,40
222,73	1,97	1,950	1,02
231,24	1,92	1,901	0,99
244,03	1,85	1,836	0,76
246,49	1,82	1,825	-0,27
252,48	1,81	1,800	0,55
256,59	1,79	1,782	0,45
261,54	1,77	1,763	0,40
266,09	1,75	1,747	0,17
278,60	1,70	1,706	-0,35
289,19	1,66	1,676	-0,96
297,61	1,67	1,655	0,90
302,60	1,64	1,643	-0,18
308,46	1,63	1,630	-0,00
313,02	1,62	1,621	-0,06
318,16	1,63	1,610	1,23
324,11	1,59	1,598	-0,50

Окончание таблицы П.2.

Т, К	$K_{\text{эксп}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$K_{\text{расч}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta K, \%$
335,43	1,56	1,576	-1,02
348,83	1,53	1,551	-1,37
352,81	1,53	1,543	-0,85
355,35	1,52	1,538	-1,18
359,03	1,52	1,530	-0,66
364,65	1,51	1,519	-0,60
371,50	1,50	1,504	-0,27
377,44	1,49	1,490	0,00
380,56	1,49	1,482	0,54
384,02	1,48	1,474	0,40
398,20	1,45	1,434	1,10
401,22	1,44	1,426	0,97

Таблица П.3 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности кристалла 0,7 La₂S₃ – 0,3 CaS от рассчитанных по (3).

T, K	$\kappa_{\text{эксп}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\kappa_{\text{расч}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta\kappa, \%$
82,49	3,37	3,345	0,74
84,86	3,33	3,299	0,93
88,21	3,23	3,237	-0,22
92,75	3,17	3,154	0,50
96,70	3,04	3,085	-1,48
100,20	2,99	3,025	-1,17
104,04	2,93	2,961	-1,06
117,14	2,74	2,758	-0,66
126,00	2,62	2,633	-0,51
133,21	2,54	2,539	0,04
142,43	2,44	2,426	0,57
149,98	2,34	2,341	-0,04
155,16	2,30	2,286	0,61
162,13	2,23	2,217	0,58
170,65	2,13	2,138	-0,38
181,41	2,05	2,048	0,10
188,23	2,01	1,997	0,65
194,79	1,95	1,951	-0,05
202,51	1,88	1,901	-1,12
207,89	1,87	1,869	0,05
212,53	1,85	1,843	0,38
217,90	1,82	1,815	0,27
222,24	1,82	1,793	1,48
230,14	1,76	1,758	0,11
238,99	1,72	1,722	-0,12
246,01	1,69	1,696	-0,36
253,10	1,67	1,673	-0,18
259,26	1,65	1,654	-0,24
266,68	1,64	1,634	0,37
277,11	1,61	1,609	0,06
288,13	1,58	1,585	-0,32
300,38	1,57	1,563	0,44
306,72	1,55	1,553	-0,19
310,10	1,53	1,547	-1,11
313,60	1,56	1,542	1,15
316,35	1,55	1,537	0,84
323,80	1,54	1,526	0,91

Окончание таблицы П.3.

T, K	$K_{\text{эксп}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$K_{\text{расч}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta K, \%$
331,52	1,50	1,515	-1,00
344,42	1,48	1,495	-1,01
359,61	1,46	1,470	-0,68
368,93	1,44	1,453	-0,90
377,48	1,42	1,435	-1,06
380,96	1,42	1,427	-0,49
385,22	1,41	1,417	-0,49
389,50	1,42	1,406	0,99
393,42	1,41	1,395	1,06
397,26	1,39	1,385	0,36
401,93	1,38	1,371	0,65

Таблица П.4 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности кристалла 0,8 La₂S₃ – 0,2 CaS от рассчитанных по (4)

T, K	$\kappa_{\text{эксп}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\kappa_{\text{расч}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta\kappa, \%$
80,38	3,03	3,018	0,40
83,02	2,99	2,974	0,54
87,26	2,93	2,905	0,85
91,28	2,83	2,841	-0,39
96,19	2,76	2,766	-0,22
101,04	2,68	2,695	-0,56
107,46	2,60	2,605	-0,19
116,01	2,48	2,492	-0,48
123,38	2,40	2,400	-0,00
130,87	2,31	2,313	-0,13
138,83	2,24	2,227	0,58
141,33	2,20	2,201	-0,04
144,06	2,17	2,174	-0,18
151,30	2,09	2,104	-0,67
162,32	2,00	2,006	-0,30
169,90	1,93	1,945	-0,78
175,82	1,88	1,900	-1,06
184,38	1,83	1,839	-0,49
187,62	1,80	1,818	-1,00
193,31	1,78	1,782	-0,11
197,84	1,74	1,755	-0,86
202,54	1,73	1,728	0,11
208,44	1,70	1,696	0,24
214,46	1,69	1,665	1,48
219,92	1,64	1,639	0,06
225,62	1,64	1,613	1,64
232,52	1,60	1,584	1,00
237,81	1,57	1,563	0,44
240,20	1,56	1,554	0,38
245,12	1,54	1,535	0,32
255,33	1,51	1,500	0,66
258,26	1,50	1,491	0,60
261,18	1,49	1,482	0,54
266,38	1,48	1,466	0,95
271,87	1,46	1,450	0,68
274,49	1,45	1,442	0,55
279,73	1,44	1,428	0,83

Окончание таблицы П.4

T, К	$K_{\text{эксп}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$K_{\text{расч}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta k, \%$
286,79	1,41	1,409	0,07
297,26	1,39	1,381	0,65
300,11	1,36	1,374	-1,18
304,70	1,35	1,362	-0,89
309,71	1,33	1,350	-1,50
314,21	1,34	1,338	0,15
319,25	1,33	1,326	0,30
325,67	1,29	1,309	-1,47
330,38	1,29	1,297	-0,54
341,83	1,25	1,265	-1,20
348,23	1,23	1,246	-1,30
354,90	1,21	1,226	-1,32
357,67	1,20	1,217	-1,42
362,38	1,19	1,201	-1,10
373,83	1,16	1,161	-0,09
378,33	1,14	1,143	-0,26
381,86	1,15	1,129	1,83
385,70	1,13	1,113	1,50
389,68	1,10	1,096	0,36
393,73	1,08	1,078	0,18
402,23	1,05	1,037	1,24

Таблица П.5 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности кристалла $0,9 \text{ La}_2\text{S}_3 - 0,1 \text{ CaS}$ от рассчитанных по (5)

T, K	$\kappa_{\text{эксп}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\kappa_{\text{расч}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta\kappa, \%$
80,23	3,08	3,075	0,16
81,17	3,05	3,059	-0,30
84,25	3,01	3,008	0,07
86,81	2,96	2,966	-0,20
93,73	2,85	2,856	-0,21
97,72	2,79	2,796	-0,22
107,20	2,67	2,658	0,45
109,23	2,64	2,630	0,38
114,60	2,56	2,558	0,07
119,12	2,49	2,499	-0,36
121,37	2,48	2,471	0,36
128,22	2,40	2,387	0,57
135,12	2,30	2,308	-0,30
147,22	2,18	2,178	0,09
154,63	2,11	2,106	0,19
161,73	2,05	2,040	0,49
171,31	1,97	1,959	0,56
178,00	1,90	1,906	-0,32
186,32	1,84	1,845	-0,27
196,62	1,76	1,775	-0,85
200,84	1,75	1,749	0,06
204,51	1,71	1,727	-0,99
208,91	1,69	1,702	-0,72
212,45	1,67	1,682	-0,72
216,07	1,66	1,663	-0,18
220,86	1,64	1,638	0,12
234,30	1,58	1,576	0,25
241,23	1,54	1,548	-0,52
246,17	1,52	1,529	-0,59
252,25	1,51	1,507	0,20
258,81	1,49	1,485	0,27
263,37	1,47	1,470	0,00
271,72	1,45	1,445	0,34
277,87	1,44	1,428	0,83
285,72	1,42	1,408	0,82
291,53	1,41	1,395	1,06
293,06	1,41	1,391	1,35

Окончание таблицы П.5

Т, К	$K_{\text{эксп}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$K_{\text{расч}},$ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$\delta K, \%$
297,75	1,39	1,380	0,72
306,20	1,37	1,362	0,58
313,23	1,35	1,348	0,15
320,93	1,34	1,333	0,52
328,19	1,32	1,319	0,08
335,60	1,29	1,306	-1,24
341,12	1,28	1,295	-1,17
348,72	1,27	1,281	-0,87
357,37	1,25	1,265	-1,20
365,22	1,24	1,249	-0,72
374,19	1,22	1,230	-0,82
382,63	1,21	1,211	-0,08
389,78	1,20	1,194	0,50
392,63	1,19	1,187	0,25
399,32	1,18	1,169	0,93
401,15	1,17	1,164	0,51

8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savage J. A., Lewis K.L., Kinsman B.E., Wilson A.R., Riddle R. Fabrication of Infrared Optical Ceramics in the $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$ Solid Solution System //30th Annual Technical Symposium. – International Society for Optics and Photonics, 1986. – C. 79-84.
2. Saunders K. J., Wong T. Y., Hartnett T.M., Tustison R.W., Gentilman R. L. Current and future development of calcium lanthanum sulfide //30th Annual Technical Symposium. – International Society for Optics and Photonics, 1986. – C. 72-78.
3. Gentilman R. L., Dekosky M. B., Wong T. Y., Tustison R.W., Hills M. E. Calcium lanthanum sulfide as a long wavelength IR material // Proc. SPIE 0929, Infrared Optical Materials IV. International Society for Optics and Photonics, 1988. – C. 57-64.
4. Hills M. E. Preparation, Properties, and Development of Calcium Lanthanum Sulfide as an 8-to 12-micrometer Transmitting Ceramic. – Naval Weapons Center China Lake CA, 1989. – Report №. NWC-TP-7037.
5. Kumta P. N., Risbud S. H. Rare-earth chalcogenides—an emerging class of optical materials // Journal of materials science. 1994. T. 29. №. 5. C. 1135-1158.
6. Tsay B. J., Wang L. H. A study on infrared transmission of lanthanum sulfide and oxysulfide in the 2.5–14 μm region // Materials Letters. 1998. T. 34. №. 3. C. 180-183.
7. Li P., Jie W., Li H. Influences of Hot-Pressing Conditions on the Optical Properties of Lanthanum Sulfide Ceramics //Journal of the American Ceramic Society. 2011. T. 94. №. 4. C. 1162-1166.
8. McCloy J. S., Riley B.J., Pierce D.A., Johnson B.R., Qiao A. Infrared-transmitting glass-ceramics: a review //SPIE Defense, Security, and Sensing. – International Society for Optics and Photonics, 2013. – C. 87080N-87080N-20.

9. Кертман А.В. Физико-химические основы получения оптической керамики состава CaLa_2S_4 // Вестник Тюменского госуниверситета. 2010. №3. С. 227-233.
10. Chess D. L., White W. B. Infrared window materials and their fabrication: Patent N 4461750 USA. – 1984.
11. Musikant S. Development of a new family of improved infrared (IR) dome ceramics// Proceedings SPIE. V. 297. Emerging Optical Materials. 1981. P. 1-12.
12. Lewis K. L., Savage J.A., Marsh K.J., Jones A. P. C. Recent Developments In The Fabrication Of Rare-Earth Chalcogenide Materials For Infra-Red Optical Applications //1983 International Technical Conference/Europe. – International Society for Optics and Photonics, 1983. – С. 21-28.
13. Field J. E., Sun Q., Gao H. Solid particle erosion of infrared transmitting materials //SPIE's 1994 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. – International Society for Optics and Photonics, 1994. – С. 301-306.
14. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Исмаилов Ш.М. Теплопроводность, тепловое расширение и микротвердость твердых растворов $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$ // Неорганические материалы. 2002. Т. 38. № 4. С. 423-427.
15. Кертман А.В. Сульфидные и фторсульфидные ИК-материалы, фазовые диаграммы, структура и свойства сульфидных соединений галлия, индия, лантанидов: автореферат дис. ...д-ра хим. наук: 02.00.04; [защищена в Тюменском гос. ун-те] Тюмень, 2010. 46 с.
16. Воронкова Е.М., Гречушников Б.И., Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 336 с.
17. Bayya S. S., Kim W., Sanghera J.S., Villalobos R., Aggarwal I.D. Calcium Lantanoid Sulfide Powders, Methods of Making, and Ceramic Bodies Formed There from : пат. 7873251 США. N US 2011/0174989 A1 – 2011.

18. Ушакова Ю. Н., Калинина Л. А., Фоминых Е.Г., Юрлов И.С., Мурин И.В. Электрохимические методы изучения транспортных свойств и типа ионной проводимости в твердых электролитах на основе CaPr_2S_4 и $\text{Ca}(\text{Ba})\text{Sm}_2\text{S}_4$ // Электрохимия. 2005. Т. 41. №. 6. С. 707-713.
19. Калинина Л. А., Ушакова Ю. Н., Медведева О. В., Широкова Г.И., Фоминых Е.Г. Термодинамические характеристики образования тройных сульфидов MeLn_2S_4 и твердых растворов на их основе // Журнал физ. хим. 2006. Т. 80. №. 11. С. 1731-1736.
20. Михайличенко Т.В. Синтез твердых электролитов на основе тиосамарата бария и изучение их электролитических свойств. Дисс. на соискание степени кандидата химических наук. С.-Петербург. СПбГУ. 2013.
21. Кошелева Е.В. Твердые электролиты в системах CaY_2S_4 - Yb_2S_3 и CaYb_2S_4 - Y_2S_3 . Дисс. на соискание степени кандидата химических наук. Екатеринбург, 2015. 152 с.
22. Андреев О.В., Кертман А.В., Дронова Г.Н. Синтез двойных сульфидов и взаимодействие в системе $\text{CaS} - \text{La}_2\text{S}_3$ // Сб. Физика и химия редкоземельных полупроводников. Новосибирск: Наука. 1990. С. 143-150.
23. Волынец Ф. К., Дронова Г.Н. Оптические керамики из сульфида лантана // В сб. Тугоплавкие соединения редкоземельных металлов. Новосибирск: Наука. 1979. С. 231-235.
24. Чучалина Л.С., Васильева И.Г., Камарзин А.А., Соколов В.В. Косвенный газохроматографический метод определения состава сульфидов лантана // ЖАХ. 1978. Т. 33. № 1. С. 190-192.
25. Koenig J. R. Thermal and Mechanical Properties of Calcium Lanthanum Sulfide. – Southern Research Inst. Birmingham AL, 1985. Final Report to Office of Naval Research Department №. SORI-EAS-85-401-5267-IF.
26. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Исмаилов Ш.М., Зобов Е.М. Влияние вакансий на тепловые и оптические свойства твердых растворов $(\text{CaS})_x(\text{La}_2\text{S}_3)_{1-x}$ // Известия РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 6. С. 851-854.

27. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Исмаилов Ш.М. Теплофизические свойства твердых растворов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$ // ТВТ. 2004. Т.42. №5. С. 704-708.
28. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Соколов В.В., Маловицкий Ю.Н. Теплопроводность γ -модификации La_2S_3 . // Неорган. матер. 1985. Т.21. №5. С.878-880.
29. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Исмаилов Ш.М., Магомедов М.-Р.М. Температурная зависимость теплопроводности и теплового расширения твердых растворов системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$ // Прикладная оптика – 2002. Доклады V Международной конференции. С.-Петербург, 2002. С. 134-137.
30. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Исмаилов Ш.М. Температура Дебая и параметр Грюнайзена системы $\text{CaLa}_2\text{S}_4\text{-La}_2\text{S}_3$ // ФТТ. 2002. Т. 44. № 6. С. 1023-1025.
31. Девяткова Е.Д., Петров А.В., Смирнов И.А., Мойжес Б.Я. Плавленный кварц как образцовый материал при измерении теплопроводности // ФТТ. 1960. Т.2, N 4. С. 738-746.
32. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Горбачев В.С. Теплофизические свойства полупроводников. М.: Атомиздат. 1972. 200 с.
33. Теплопроводность твердых тел. М.: Энергоатомиздат. 1984. 321 с.
34. Методика ГСССД МЭ 218-2014. Методика экспериментального определения теплопроводности твердых тел в диапазоне температур 80-450 К / С.М. Лугуев, И.А. Смирнов, Н.В. Лугуева; Росс.научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М., 2014. 30 с.: М., 2014. 30 с. : Ил.- 5; Табл.- 3; Библиогр. назв. 31. – рус. 27 назв. Деп. в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ” 31.03.2014, № 912а-2014кк.
35. Genzel L. Der Anteil der Wärmestrahlung bei Wärmeleitungsvorgängen // Zeitschrift für Physik. 1953. V. 135. №. 2. S. 177-195.